

Évaluer le temps de rupture d'une digue en remblai érodée par conduit traversant

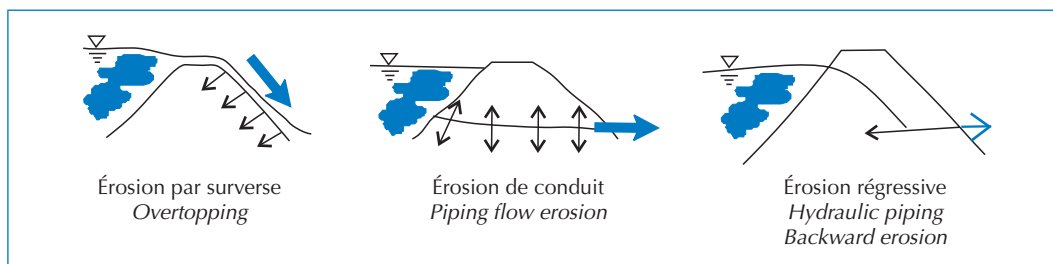
Stéphane Bonelli, Nadia Benahmed, Pierre Philippe, Alain Bernard, Yves Grêmeaux et Guillaume Nunes

L'érosion est la principale cause de rupture des ouvrages hydrauliques (digues, barrages), conduisant à l'inondation des zones aval. En France, elle conduit à une rupture par an en moyenne. En ce qui concerne les digues fluviales de protection contre les inondations, le réchauffement climatique laisse craindre une augmentation de fréquence ou d'intensité des crues, et par conséquent une augmentation des dégâts causés par l'érosion du sol de la digue. Ce problème a été mis en lumière par les récentes inondations dans le Sud-Est de la France : ruptures de la digue d'Aramon en septembre 2002, des digues du Vidourle en septembre et décembre 2002 et des digues de Fourques et du nord d'Arles en décembre 2003. Dans le reste du monde, les catastrophes dues au phénomène d'érosion sont aussi tristement célèbres que récentes (digues maritimes de La Nouvelle Orléans, 2005).

Deux types d'érosion sont susceptibles de conduire très rapidement à la rupture de

l'ouvrage : la surverse et l'érosion de conduit (figure 1). L'érosion de conduit est responsable des seize brèches dans les digues de Camargue, survenues lors des deux crues du Rhône de l'hiver 1993-1994. C'est également le mécanisme principal de rupture d'ouvrages de stockage d'eau et de leur fondation. La rupture en moins de quatre heures du barrage de Teton aux États-Unis en 1976 (100 m de haut) est la référence historique. Les petits barrages sont également concernés, comme en témoigne la rupture du barrage des Ouches dans le Puy-de-Dôme en juillet 2001.

Il existe plusieurs types de digues en remblai : les digues fluviales de protection contre les inondations (également appelées levées), les digues de canaux (hydroélectriques, pour l'irrigation) et les digues maritimes. L'enjeu est de définir la vulnérabilité des zones susceptibles d'être inondées en aval de ces ouvrages. Lorsqu'une érosion interne est pressentie ou détectée *in situ*, comment évaluer le temps de



▲ Figure 1 – Trois types d'érosion rencontrés sur les digues.

Les contacts

Cemagref, UR OHAX,
Ouvrages hydrauliques
et hydrologie,
3275 route de
Cézanne, CS 40061,
13182 Aix-en-Provence
Cedex 5

rupture ? Doit-on compter cela en heures ou en jours ? C'est l'objet du présent article, qui concerne essentiellement les levées. Évaluer ce temps de rupture est crucial pour choisir le type d'intervention à entreprendre et mettre en place une gestion adaptée du risque sur le terrain.

État de l'art

L'érosion par surverse est étudiée et correctement modélisée : en 1998, elle a fait l'objet d'un bulletin ICOLD (*International Commission on Large Dams*) qui fait toujours référence, en complément de l'ouvrage de Singh (1996). De plus, ce mécanisme de dégradation a été traité dans le cadre de trois projets européens (encadré 1). En ce qui concerne l'érosion interne, les documents intéressants sont peu nombreux. Le numéro spécial de *Barrages et réservoirs*, édité par le CFBR (Comité français des barrages et réservoirs) à l'occasion du congrès ICOLD de 1997 à Florence, présente une description des différents types d'érosion interne à l'ouvrage, un état de l'art de la détection et de nombreux cas documentés. Deux ouvrages récents font référence : celui de Fell et Fry (2007), qui correspond à l'atelier international d'Aussois organisé par ces auteurs, et le rapport du groupe

européen ICOLD (2007) sur l'érosion interne. L'état de l'art y est bien décrit, et les progrès réalisés depuis 1997 sont visibles. Toutefois, ces ouvrages ne contiennent pas de bases solides en termes de modélisation. Concernant ce point, tandis que le domaine pétrolier a bien avancé sur la question (Papamichos *et al.*, 2006), nous considérons que l'essentiel reste à faire en géomécanique.

Il y a plusieurs types d'érosion interne à l'ouvrage. L'érosion de conduit (figure 2) représente le mécanisme ultime, celui qui provoque rapidement la rupture. Il est peu étudié et n'a pas encore été modélisé. Les seuls travaux publiés concernent des essais de laboratoire. Ce mécanisme ne doit pas être confondu avec l'érosion régressive, introduite par Terzaghi en 1927 sous le nom de *Hydraulic piping* et dénommée *renard* par la communauté francophone. C'est pour cela que nous l'appelons *érosion de conduit traversant* (*Piping Flow Erosion*).

Modélisation

La modélisation a été abordée de manière rigoureuse en décrivant un écoulement turbulent diphasique sur un sol, et en tenant compte de l'érosion du sol et du transport des particules de sol érodées (Bonelli et Brivois, 2008). Cette description complexe a ensuite été simplifiée à l'aide d'hypothèses correspondant aux situations rencontrées en pratique sur les digues, ainsi qu'au laboratoire. Les quatre hypothèses principales sont les suivantes :

– **écoulement allongé.** Le rayon du conduit est inférieur à la longueur de celui-ci. Les grandeurs essentielles qui pilotent le phénomène sont alors la vitesse longitudinale moyenne de l'écoulement V et la contrainte de cisaillement τ_b exercée par celui-ci sur les parois du conduit (le sol) ;

► Figure 2 – Exemple de conduit dans un ouvrage.



Encadré 1

Pour en savoir plus sur les programmes européens au cours desquels l'érosion par surverse a fait l'objet de recherches

- CADAM (4^e PCRD¹), *Concerted Action for Dam Break Modelling*
www.hrwallingford.co.uk/projects/CADAM
- IMPACT (5^e PCRD), *Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty*
www.samui.co.uk/impact-project
- FloodSite (6^e PCRD), *Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies*
www.floodsite.net

1. Programme cadre de recherche et développement.

– **écoulement turbulent.** La vitesse de l'écoulement est suffisamment grande pour que le nombre de Reynolds soit très supérieur à 1 (donc les forces de viscosité moléculaire sont négligeables), et la rugosité des parois du conduit induit de la turbulence (si bien que la contrainte τ_b est proportionnelle au carré de la vitesse V^2);

– **faible cinétique d'érosion.** La vitesse moyenne d'écoulement V est très supérieure à la vitesse moyenne d'érosion, $V_{er} = R / t_{er}$, où R est le rayon du conduit et t_{er} le temps caractéristique d'érosion. Il en résulte que l'énergie cinétique relative à l'érosion est négligeable devant celle développée par l'écoulement et que la contrainte de cisaillement τ_b est égale à la pression motrice due au gradient de pression entre l'amont et l'aval. En effet, les vitesses d'écoulement sont de 1 à 10 m/s, tandis que les vitesses d'érosion sont toujours inférieures au cm/s;

– **écoulement dilué.** L'écoulement dilué suppose que le débit d'écoulement est très supérieur au débit de masse érodée, et aussi que le conduit n'est pas suffisamment long pour que l'accumulation des particules de sol érodé le long de celui-ci ne transforme l'eau en boue.

La loi d'érosion est constitutive de l'interface sol/écoulement. On suppose que le flux de masse érodée \dot{m} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) est proportionnel à la contrainte de cisaillement τ_b exercée par l'écoulement sur le sol, au-delà d'une contrainte seuil de déclenchement de l'érosion, notée τ_c (encadré 2).

Cette loi d'érosion introduit le coefficient de cinétique d'érosion k_{er} ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$). Ce paramètre essentiel est au cœur du présent travail : c'est lui qui pilote la vitesse de dégradation par érosion et qui va permettre de quantifier le temps de rupture de l'ouvrage.

Sous ces hypothèses, les équations du système se simplifient considérablement. Si de plus, on suppose que les niveaux amont et aval sont constants (ce qui est l'hypothèse la plus pessimiste), alors les évolutions sont bien modélisées par les équations de l'encadré 3.

Le tableau 1 explicite les notations. L'indice « 0 » indique la valeur à l'instant t_0 : ces expressions

Encadré 2

Loi d'érosion

$$\dot{m} = \begin{cases} 0 & \text{si } \tau_b \leq \tau_c \\ k_{er}(\tau_b - \tau_c) & \text{si } \tau_b > \tau_c \end{cases}$$

Encadré 3

Équations d'agrandissement du conduit par érosion

$$\text{Débit d'écoulement} \quad Q(t) = Q_0 \left(\frac{R(t)}{R_0} \right)^{5/2}$$

Rayon du conduit

$$R(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \tau_c > P_0 \\ R_0 \frac{\tau_c}{P_0} + R_0 \left(1 - \frac{\tau_c}{P_0} \right) \exp\left(\frac{t - t_0}{t_{er}} \right) & \text{si } \tau_c < P_0 \end{cases}$$

$$\text{Pression motrice initiale} \quad P_0 = \frac{\rho_w g \Delta H_w R_0}{2L}$$

$$\text{Temps caractéristique d'érosion} \quad t_{er} = \frac{2\rho_{sol}L}{\rho_w g \Delta H_w k_{er}}$$

▼ Tableau 1 – Notations.

Notation	Unité	Description
ΔH_w	(m)	Différence de niveau d'eau entre amont et aval
L	(m)	Longueur du conduit
$Q(t)$	(m^3/s)	Débit d'écoulement
$R(t)$	(m)	Rayon du conduit
$P(t)$	(Pa)	Pression motrice
g	(m/s^2)	Constante gravitationnelle
ρ_w	(kg/m^3)	Masse volumique de l'eau
ρ_{sol}	(kg/m^3)	Masse volumique du sol
t_{er}	(s)	Temps caractéristique d'érosion
V	(m/s)	Vitesse moyenne d'écoulement dans la conduit
f_b	-	Coefficient de frottement de l'écoulement
τ_b	(Pa)	Contrainte de cisaillement de l'écoulement sur le sol
τ_c	(Pa)	Contrainte critique du sol
k_{er}	(s/m)	Coefficient de cinétique d'érosion du sol
Δt_u	(s)	Intervalle de temps entre détection et rupture
Q_{peak}	(m^3/s)	Débit de pointe
R_{min}	(m)	Rayon minimum du conduit pour déclencher l'érosion
R_d	(m)	Rayon du conduit au moment de la détection
R_u	(m)	Rayon maximum du conduit avant effondrement
H_{dam}	(m)	Hauteur de l'ouvrage

sont valables à tout moment et relient les valeurs actuelles, à l'instant t , aux valeurs supposées connues à un instant antérieur quelconque t_0 , pourvu que la différence de pression entre l'amont et l'aval sur cet intervalle de temps soit constant.

Expérimentations de laboratoire

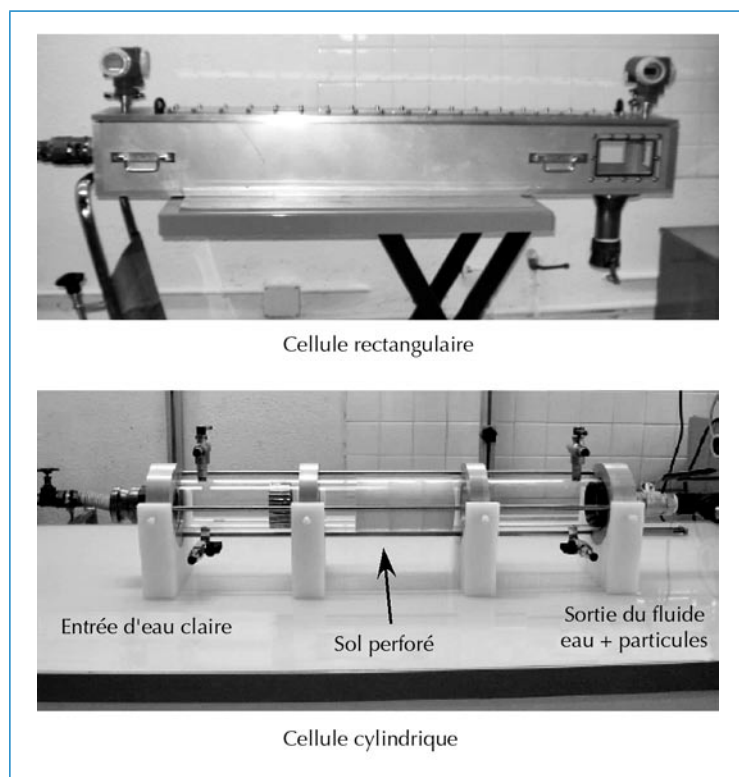
Le *Hole Erosion Test* (HET) a fait l'objet d'investigations importantes : de nombreux essais ont été réalisés sur plusieurs sols (Wan et Fell, 2002). Le principe n'est pas nouveau : Lefebvre *et al.* (1985) l'avait dénommé « *drill-erosion test* ». Il s'est avéré être simple, robuste et bien adapté à la caractérisation du phénomène. Cet essai n'a

rien à voir avec l'essai historique de la mécanique des sols qu'est le *Pin Hole Test*, qui a initialement été imaginé pour caractériser les sols dispersifs avec de l'eau distillée, et duquel on ne tire aucun résultat quantitatif.

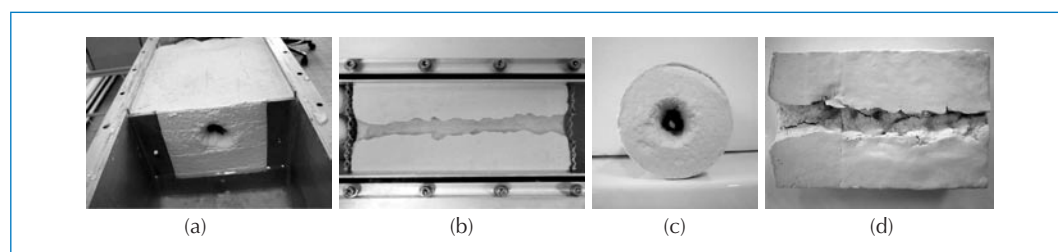
Nous avons développé un HET qui permet de réaliser des essais sur un sol remanié ou sur un sol intact, prélevé sur le terrain (figures 3 et 4). Le mode opératoire a été très précisément élaboré pour que l'essai soit reproductible et ne dépende pas de l'opérateur. L'instrumentation est moderne et informatisée. Elle contient notamment des capteurs de pression, un débitmètre et un turbidimètre. Le pas de temps d'acquisition est d'une seconde. La durée d'un essai est de l'ordre de trois à six heures. À ce temps, il convient de rajouter la préparation de l'échantillon, qui suit également un mode opératoire précis.

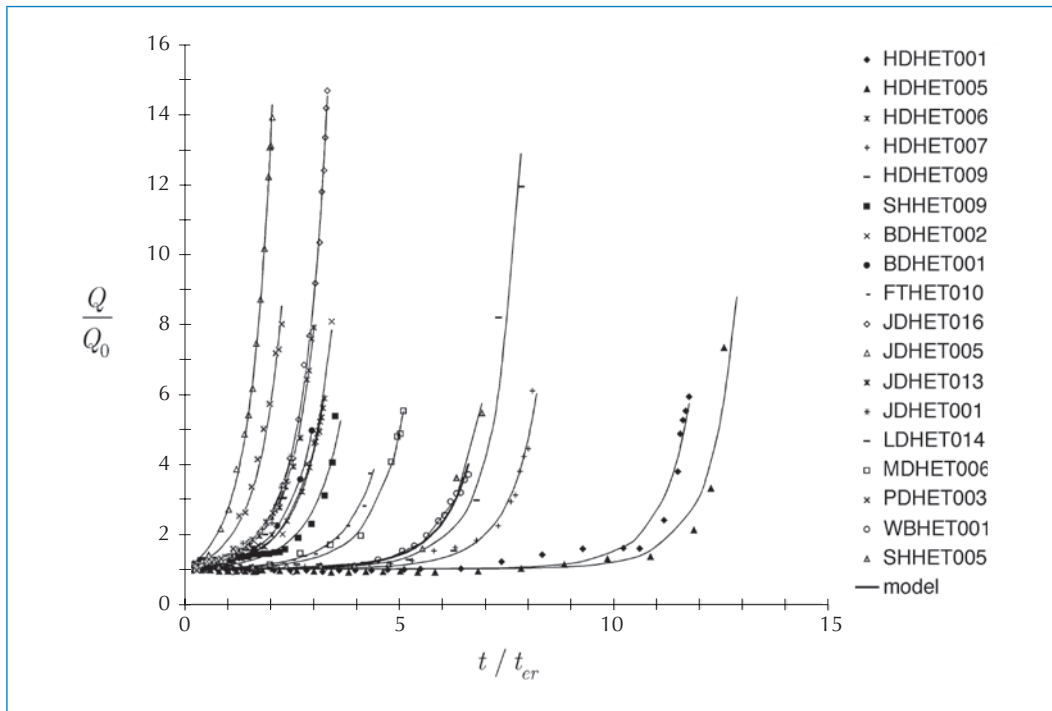
Le principe est simple : un conduit de 3 mm de rayon est préalablement réalisé dans l'échantillon de sol, puis l'eau est mise en circulation dans le conduit de façon contrôlée, de manière à déclencher l'érosion. Le modèle est alors utilisé pour analyser les mesures et en déduire les deux paramètres d'érosion : la contrainte critique τ_c et le coefficient de cinétique d'érosion k_{er} . La gamme de valeurs de ces paramètres correspondant à des sols provenant d'ouvrages existants est large : de quelques Pa à 200 Pa (environ) pour τ_c , de 10^{-1} s/m à 10^{-7} s/m pour k_{er} . Un exemple de courbes obtenues sur des sols de nature différente (argile sableuse, sable argileux...) est représenté sur la figure 5, où nous avons tracé le débit adimensionné en fonction du temps adimensionné. Sans cet adimensionnement, il n'aurait même pas été possible de regrouper les résultats sur un même graphique : le temps caractéristique d'érosion pour ces résultats s'étend de 57 s à 2 183 s. La figure 6 démontre la validité du modèle d'interprétation, en regroupant tous ces résultats sur la courbe maîtresse définie par une exponentielle en temps.

▼ Figure 3 – Cellules de *Hole Erosion Test* élaborées au Cemagref.

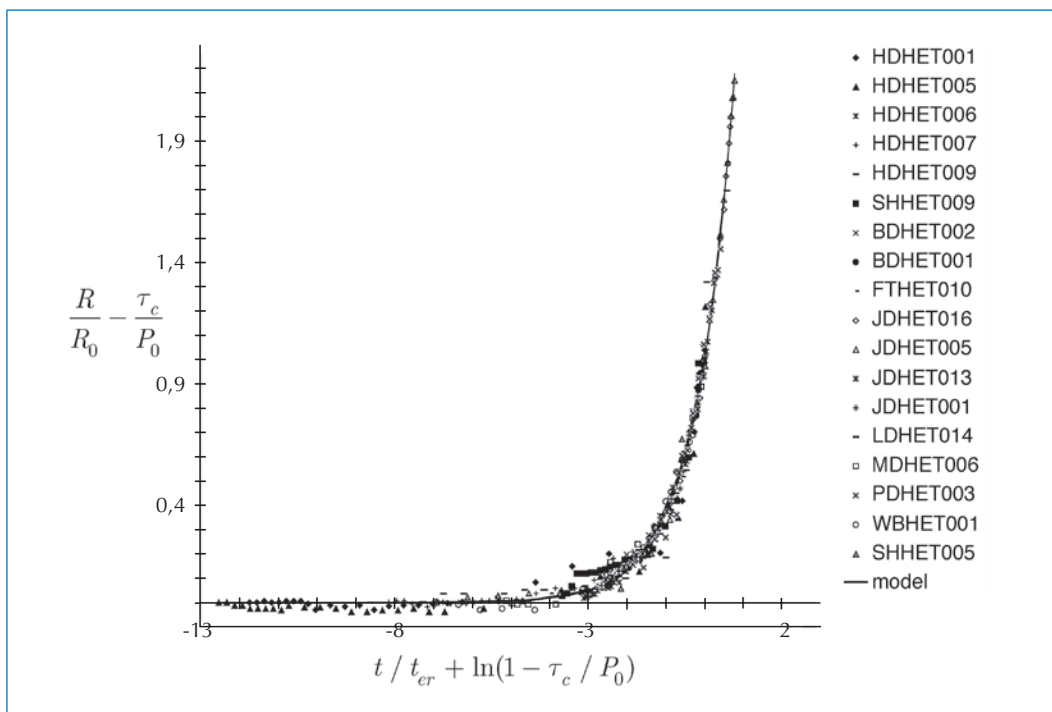


► Figure 4 – Exemple d'échantillons de sol après érosion sur la cellule rectangulaire (a et b) et sur la cellule cylindrique (c et d).





▲ Figure 5 – Résultats d'essai HET à pression constante sur plusieurs sols différents. Débit adimensionné en fonction du temps adimensionné.



▲ Figure 6 – Résultats d'essai HET à pression constante sur plusieurs sols différents. Regroupement de tous les résultats sur la courbe maîtresse.

Formules simplifiées pour les ouvrages

Nous proposons de considérer trois phases pour la rupture (figure 7) :

- une phase d'initiation, par exemple par érosion régressive, qui se termine par la création d'un conduit traversant qui relie l'amont à l'aval ;
- une phase d'agrandissement du rayon par érosion de conduit, qui se termine par l'effondrement du toit du conduit et la création d'une brèche ;
- une phase d'élargissement de la brèche et de propagation à l'aval de l'onde de submersion qui provoque l'inondation.

La cinétique d'érosion a une influence sur la vitesse de développement d'une érosion de conduit, sur le temps de formation de la brèche

et sur le moment d'apparition du débit de pointe. Cette information est cruciale pour évaluer le temps disponible et pour choisir le type de gestion de l'événement.

Les deux paramètres principaux de brèche sont le temps de rupture et le débit de pointe. Une analyse critique des relations existantes a été présentée par Wahl (1998). Ces relations empiriques sont pour la plupart de simples régressions exprimant les paramètres de brèche en fonction d'informations concernant le barrage ou la retenue. Il est impossible que de telles relations, qui ne contiennent pas d'information relative à l'érodabilité du sol, ait un quelconque caractère prédictif. De plus, ces relations ne concernent que l'érosion par surverse. Lorsqu'une érosion de conduit est soupçonnée ou a déjà été détectée *in situ*, la littérature ne contient rien qui permette d'évaluer la cinétique d'érosion. Nous proposons ici des relations mécaniquement fondées et originales, reliant le rayon du conduit, le temps de rupture et le débit de pointe, à des paramètres relatifs au barrage, dont le coefficient d'érosion fait partie (encadré 4).

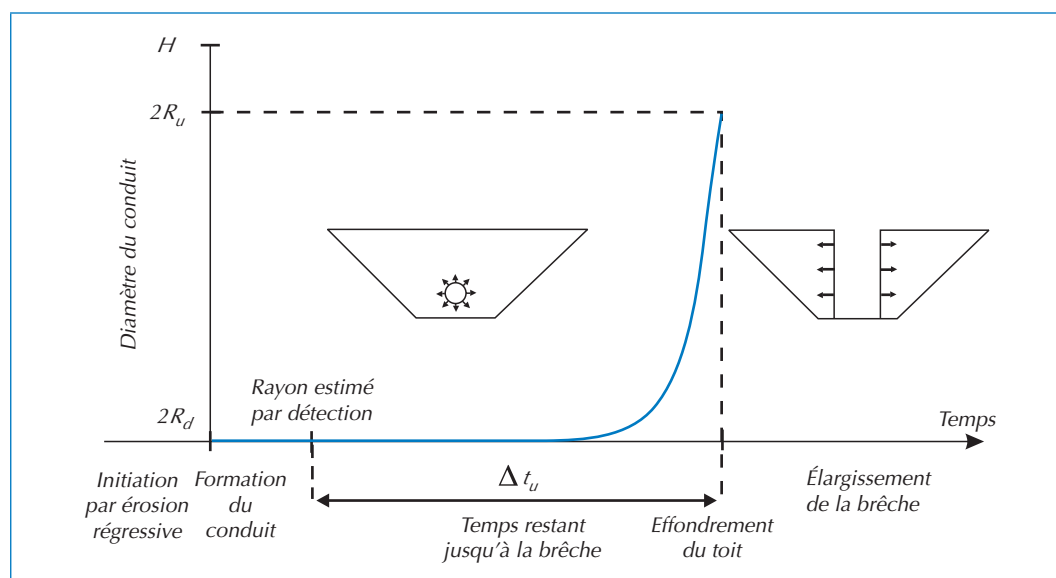
Le tableau 1 explicite les notations. Le rayon R_{\min} correspond au rayon minimum pour que l'érosion soit déclenchée. Le temps de rupture Δt_u correspond à l'intervalle de temps entre la détection, qui fournit le rayon du conduit R_d au moment de cette détection, et l'effondrement de l'ouvrage lorsque le rayon ultime R_u est atteint.

Encadré 4

Relations simplifiées pour la rupture par érosion de conduit

Rayon minimum	$R_{\min} = \frac{2L\tau_c}{\rho_w g \Delta H_w}$
Temps de rupture	$\Delta t_u = t_{er} \ln \left[\frac{R_u - R_{\min}}{R_d - R_{\min}} \right]$
Débit de pointe	$Q_{peak} = \pi R_u^{5/2} \sqrt{\frac{g H_{dam}}{2f_b L}} \sqrt{\frac{\Delta H_w - R_u}{H_{dam} - R_u}}$

► Figure 7 – Les trois phases de dégradation et de rupture par *piping flow erosion*.



Le débit de pointe Q_{peak} est supposé survenir juste au moment de cet effondrement, qui correspond à la transition entre écoulement de conduit et écoulement à surface libre.

Ces résultats ne relient pas Δt_u et Q_{peak} à la capacité du réservoir comme cela est habituellement proposé dans la littérature ; c'est d'ailleurs mécaniquement incohérent. Ici, Δt_u et Q_{peak} sont explicitement fonction du rayon maximum avant effondrement, noté R_u . Ces relations ne peuvent être utiles que si R_u peut être estimé *a priori*, en fonction des paramètres de résistance du sol, mais cette relation n'est pour l'heure pas connue.

Études de cas de barrages

Les ruptures de digues ne sont pas encore documentées. Les documents correspondant aux études de cas de barrages fournissent très peu d'information. Ceci est notamment dû à l'absence de dispositifs de mesure pendant l'événement. Lorsqu'il y a eu un témoin visuel (ce qui est rare), les informations sont souvent biaisées par

son interprétation personnelle de cet événement exceptionnel. Dans le meilleur des cas, on connaît le temps de rupture et le débit de pointe. Le débit de fuite au moment de la détection n'est jamais estimé.

Pour valider l'approche, nous utilisons ici dix-huit cas documentés de rupture par érosion de conduit, extraits de la base de données de Wahl (1998), qui contient cent huit études de cas de rupture de barrages en terre (il n'y a pas d'équivalent pour les digues). Le tableau 2 contient les données et les résultats de cette analyse simplifiée. La hauteur du barrage H_{dam} est comprise entre 6 m et 93 m. Le temps à la rupture Δt_u est compris entre 0,5 h et 5,25 h. Le débit de pointe Q_{peak} est compris entre 79 m³/s et 65 120 m³/s.

L'indice d'érosion moyen $I_{er} = -\log(k_{er}[s/m])$ est finalement compris entre 2,7 et 3,6. Ce résultat est très surprenant. Les indices d'érosion trouvés par Wan et Fell (2002) sur plus de deux cents essais au *Hole Erosion Test* couvrent plusieurs ordres de grandeur : $1 \leq I_{er} \leq 7$. Sachant que $\Delta t_u \propto 10^{I_{er}}$, ceci signifie que les cas documentés

Nom du barrage	H_{dam} (m)	Δt_u (h)	Q_{peak} (m ³ .s ⁻¹)	R_u (m)	I_{er}
Ireland No. 5, Colo.	6,0	0,5	110	1,49	2,7
Pierce Reservoir, Wyo.	8,1	1			2,9
Lower Latham, Colo.	8,6	1,5	340	2,30	3,1
Frankfurt, Germany	9,8	2,5	79	1,19	3,4
Hebron, USA	11,6	2,25			3,2
Kelly Barnes, Ga.	11,6	0,5	680	2,42	2,9
French Landing, Mich.	12,2	1,16	929	3,36	3,0
Lake Latonka, Penn.	13,0	3	290	2,18	3,5
Wheatland No. 1, Wyo.	13,6	3			3,3
Lake Avalon, N.M.	14,5	2	2 320	4,47	3,2
Lake Frances, Calif.	15,2	1			2,8
Quail Creek, Utah	18,9	1	3 110	5,13	2,8
Hatchtown, Utah	19,2	4	3 080	4,87	3,6
Little Deer Creek, Utah	26,2	0,66	1 330	3,49	2,8
Bradfield, England	29,0	0,5	1 150	2,98	2,8
Apishapa, Colo.	34,1	3,25	6 850	6,85	3,4
Hell Hole, Calif.	67,1	0,75	7 360	7,13	2,9
Teton, Idaho	93,0	5,25	65 120	17,15	3,5

◀ Tableau 2 – Évaluation du temps de rupture et du débit de pointe des dix-huit cas de rupture de barrages par *piping flow erosion* de la base de Wahl (1998).

de ruptures de barrages ne concernent que des sols modérément érodables à très érodables, au sens de Wan et Fell (2002), soit $I_{er} \approx 3$.

On peut en déduire que :

- les barrages sont en général construits avec ce type de sol ($I_{er} \approx 3$) ;
- seuls quelques-uns ont été mis en situation de rupture ;
- lorsque la rupture survient, elle est très rapide (quelques heures).

On peut également faire une autre analyse, qui nous semble mieux correspondre à la réalité :

- les barrages sont susceptibles d'être construits avec des sols variables ($1 \leq I_{er} \leq 7$) ;
- un certain nombre est susceptible d'être ou d'avoir été en situation de rupture ;
- seuls ceux ayant un sol modérément érodable à très érodable ($I_{er} \approx 3$) ont eu le temps de rompre.

Importance du coefficient d'érosion dans le cas des digues

Intéressons-nous maintenant aux digues fluviales de protection contre les inondations. En se focalisant sur le temps de rupture, on peut simplifier l'analyse en faisant les hypothèses suivantes :

- $R_u = H_{dam} / 2$. L'ouvrage est de faible hauteur (moins de 10 m), et l'expérimentation de grande dimension réalisée dans le cadre du projet européen IMPACT sur un ouvrage constitué d'un sol très peu cohésif montre que cette hypothèse est pertinente ;
- $\Delta H_w = H_{dam}$. La hauteur d'eau amont est supposée constante et maximum, c'est-à-dire égale à la hauteur de l'ouvrage ;
- $R_u - R_{min} \approx H / 2$. L'analyse des ordres de grandeurs montre $R_{min} = 1$ mm si $\tau_c = 1$ Pa, et que $R_{min} = 30$ cm si $\tau_c = 300$ Pa. Cette dernière valeur fournit une borne supérieure de ce que nous pouvons rencontrer en pratique ;
- $R_u - R_{min} \approx 10$ cm. Ceci revient d'une part à négliger R_{min} (ce qui est pessimiste), et d'autre part à intégrer l'ordre de grandeur de défauts préexistants dus à des racines ou à des terriers (qui ne sont ni de l'ordre du centimètre, ni de l'ordre du mètre). De plus, un défaut de l'ordre du centimètre est difficilement détectable sans

auscultation fine, et un défaut de l'ordre du mètre sera détecté bien avant d'avoir atteint une telle ampleur.

Enfin, l'analyse des études de cas montre que nous pouvons retenir les ordres de grandeur suivants : $\rho_{sol} / \rho_w \approx 2$, $L / H_{dam} \approx 2$ à 4, $H_{dam} \approx 5$ à 10 m et $f_b \approx 0,005$. Cette estimation du coefficient de frottement $f_b = \tau_b / (\rho_w V^2)$ correspond à un écoulement turbulent dans un conduit rugueux.

Il vient alors la formule très simplifiée suivante :

$$\text{temps de rupture : } \Delta t_u [mn] \approx 5 \times 10^{I_{er}-2}$$

Cette expression donne l'ordre de grandeur de rupture d'une digue de 5 à 10 m de haut, soumise à un niveau amont maximum et à une érosion de conduit qui vient d'être détectée. Si le sol a un indice d'érosion $I_{er} \approx 2$, la rupture aura lieu en quelques minutes : c'est le cas de l'ouvrage réalisé dans le cadre du projet européen IMPACT (2003). Si le sol a un indice d'érosion $I_{er} \approx 3$, la rupture aura lieu en quelques heures : c'est le cas des dix-huit barrages répertoriés dans la base de données de Whal (dont le barrage de Teton). Si le sol a un indice d'érosion $I_{er} \approx 4$, la rupture aura lieu en quelques jours : nous n'avons pas connaissance de tels cas, c'est-à-dire d'ouvrages ayant été laissés tel quel pendant quelques jours. Dans le cas de barrages, il est fort probable que pour une telle situation, des décisions aient été prises (vidange du réservoir). Dans le cas de digues de protection, soit la décrue a eu lieu avant la rupture, soit la rupture a bien eu lieu après plusieurs jours, mais sans que cela n'ait été documenté.

Conclusion

L'érosion de conduit dans un ouvrage hydraulique (digues, barrages) est l'une des causes principales de rupture. Lorsqu'un conduit est détecté, il est possible d'estimer la cinétique d'érosion et le temps restant avant l'effondrement de l'ouvrage. Il faut pour cela connaître le coefficient de cinétique d'érosion du sol. Ce coefficient peut être connu *a priori* avec une expérimentation de laboratoire adaptée : le *Hole Erosion Test* (HET). Il en résulte que le HET doit faire partie de la palette d'essais géotechniques déployés lors d'une évaluation de la sécurité des digues, et que le coefficient de cinétique d'érosion doit faire partie des paramètres géotechniques. Dans le cas d'une digue, nous trouvons les résultats suivants : si ce coefficient d'érosion est de l'ordre de 10^{-2} s/m (indice d'érosion 2),

alors la rupture aura lieu très rapidement, en quelques minutes. S'il est de l'ordre de 10^{-3} s/m (indice d'érosion 3), on dispose de quelques heures avant la rupture de la digue. S'il est inférieur à 10^{-4} s/m (indice d'érosion 4), alors la rupture potentielle ne surviendra pas avant plusieurs jours, ce qui laisse le temps de prendre des mesures appropriées. □

Résumé

L'érosion par agrandissement de conduit traversant est l'une des principales causes de rupture des digues. Ce conduit peut notamment être dû à des racines ou à des terriers. Pour estimer le temps restant avant l'effondrement de l'ouvrage et l'inondation des zones aval, il est nécessaire de connaître le coefficient de cinétique d'érosion du sol. Ce paramètre géotechnique peut être connu *a priori* avec une expérimentation de laboratoire adaptée : le *Hole Erosion Test* (HET). Nous proposons des formules simplifiées permettant d'estimer le temps de rupture en fonction de ce paramètre d'érosion.

Abstract

The piping flow erosion process, involving the enlargement of a continuous tunnel between upstream and downstream, is a major cause of dike break. Such a pipe can be imputed to roots or burrows. The coefficient of erosion must be known in order to estimate the remaining time to failure and to downstream flood. The Hole Erosion test is a laboratory experiment especially suited to estimate *a priori* this geotechnical parameter. We propose therefore simplified expressions for the remaining time to breaching accounting for this erosion parameter.

Bibliographie

- BONELLI, S., 2006, A characteristic time for progression of piping in hydraulic works, *in : 22th International Congress on Large Dam*, Barcelone, 19-23 juin 2006.
- BONELLI, S., BRIVOIS, O., BENAHMED, N., 2007, Modélisation du renard hydraulique et identification de l'essai d'érosion de trou, *Revue Française de Géotechnique*, vol. 118, p. 13-22.
- BONELLI, S., BRIVOIS, O., 2008, The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 32, p. 1573-1595.
- PAQUIER, A., 2001, Rupture de barrage : validation des modèles numériques du Cemagref dans le cadre de CADAM, *Ingénieries-EAT*, n° 28, p. 11-21.
- FELL, R., FRY, J.-J., 2007, *Internal Erosion of Dams and Their Foundations*, Taylor & Francis, London.
- FRY, J.-J., 1997, *Internal Erosion : Typology, Detection, Repair, Barrages and Reservoirs*, n° 6, CFBR, Le Bourget-du-Lac.
- ICOLD, 1998, *Dam-break Flood Analysis, Review and Recommendations*, Bulletin n° 111, 301 p.
- ICOLD, 2007, *Assessment of the Risk of Internal Erosion of Water Retaining Structures : Dams, Dykes and Levees*, Intermediate Report of the European Working Group of ICOLD, TUM Edt.
- LEFEBVRE, G., ROHAN, K., DOUVILLE, S., 1985, Erosivity of natural intact structured clay : evaluation, *Canadian Geotechnical Journal*, n° 22, p. 508-517.
- PAPAMICHOS, E., DESMORAT, R., VARDOULAKIS, I., 2006, *Geomechanical and structural issues in energy production*, Special issue of European Journal of Civil Engineering, Hermes.
- SINGH, V.-P., 1996, *Dam breach modelling technology*, Water Science and Technology Library, Kleiwer Academic Publishers.
- WAHL, T.-L., 1998, *Prediction of embankment dam breach parameters, a literature review and needs assessment*, Dam Safety Rep n° DSO-98-004, US Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO.
- WAN, C.-F., FELL, R., 2002, Investigation on internal erosion and piping of soils in embankment by Slot Erosion Test and the Hole Erosion Test, UNICIV report n° R-412.